

MIGUEL ANGELO MASTELLA

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E TOXICOLÓGICA
DE PAVIMENTOS DE CONCRETO CONTENDO RESÍDUO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO**

Dissertação de Mestrado – DM
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade do Extremo
Sul Catarinense - UNESC, como
requisito à obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem
Klegues Montedo

Co-orientador: Prof. Dr. Elídio
Angioletto

**CRICIÚMA
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M423a Mastella, Miguel Angelo.

Avaliação mecânica e toxicológica de pavimentos de concreto contendo resíduos de areia de fundição / Miguel Angelo Mastella; orientador: Oscar Rubem Klegues Montedo, co-orientador: Elídio Angioletto. – Criciúma, SC, Ed. do Autor, 2013.

67 p : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2013.

1. Blocos de concreto. 2. Resíduo de areia de fundição. 3. Toxicidade. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD. 22^a ed. 624.1834

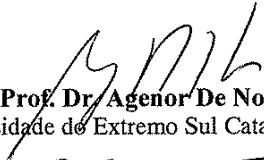
Miguel Angelo Mastella

Avaliação mecânica e toxicológica de pavimentos de concreto contendo resíduo de areia de fundição.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 20 de agosto de 2013.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Agenor De Noni Junior
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Claus Troger Pich
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta oportunidade.

À minha família, em especial minha esposa pela compreensão e incentivo nesta jornada.

Meus agradecimentos especiais ao meu orientador prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, pelos ensinamentos e pela paciência na construção deste trabalho.

Agradeço também ao meu co-orientador, prof. Dr. Elídio Angioletto.

Aos professores, Dr. Fernando Pelisser, Dr. Luciano da Silva e M.Sc. Claudio Ricken, no auxílio incansável nos ensaios de laboratório.

Ao acadêmico Edivelton S. Gislou do Laboratório de Cerâmica Técnica-CerTec da UNESC pelos ensaios de laboratório.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite.

Ao prof. M.Sc. Luciano Antunes pelo companheirismo.

A UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense pelo apoio.

A todos os professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) pelo convívio e a amizade ao longo do curso.

RESUMO

O processo de fundição de metais ferrosos e não ferrosos utiliza moldes, em geral compostos de areia, para dar forma à peça. Dependendo do processo de fabricação do molde (a base principalmente de areia verde e utilizando resina fenólica ou alquídica, entre outras), a areia pode conter substâncias que impedem a deposição direta no ambiente, e na maioria das vezes é classificada de acordo com a Norma ABNT NBR 10004:2004 como resíduo de Classe IIA - Não Inerte. A reutilização deste resíduo é limitada, visto que suas características mudam significativamente após o uso. Por outro lado, o emprego (reaproveitamento) deste subproduto na construção civil é uma alternativa tecnicamente viável; entretanto, o efeito de sua adição deve ser avaliado, sobretudo sob o ponto de vista mecânico e ambiental. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar o efeito do emprego do resíduo de areia de fundição na confecção de artefatos cimentícios, tais como: blocos de alvenaria para paredes, blocos de alvenaria estrutural, blocos de pavimentação, entre outros. Blocos contendo teores de substituição de areia por resíduo de areia de fundição entre 0 e 50% em peso foram confeccionados e avaliados por meio de ensaios de resistência à compressão e testes de toxicidade, utilizando-se *Daphnia magna*, raiz de cebola e minhoca. O estudo com material obtido da lixiviação apontou viável a substituição de até 25% em peso de areia por este resíduo para a produção dos blocos de concreto. As propriedades mecânicas também foram avaliadas e os resultados mostraram que a Composição C2, contendo 25% em peso de substituição de areia por resíduo de areia de fundição, apresentou resistência à compressão aos 56 dias de superior a 35 MPa, mostrando que não houve perda considerável na resistência à compressão com a adição do resíduo.

Palavras-chave: resíduo, areia de fundição, blocos de concreto, toxicidade, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Casting process of ferrous and nonferrous materials use molds generally made of sand to form the piece. Depending on the manufacturing process of the mold (based on green sand and using phenolic resin or alkyd), the sand may contain substances which prevent direct deposition on the environment, is most often classified according to standard ABNT NBR 10004:2004 as waste Class II – non inert. The recycling of this waste is limited, since their characteristics change significantly after its use. On the other hand, the reuse of this by-product in the construction industry is a technically feasible alternative; however, the effect of the addition should be evaluated, especially from the mechanical and environmental point of view. Thus, the objective of this work is to study the effect of using the waste of foundry sand in cement materials, such as masonry blocks for walls, masonry blocks, paving blocks, among others. Blocks containing up to 50wt% of substitution of sand by foundry sand were prepared and evaluated by compressive strength testing and toxicity testing, using *Daphnia magna*, onion root, and earthworm. Results showed that the leaching material showed a feasible alternative to use up to 25wt% (Composition C2) of substitution of sand by this waste for the production of concrete blocks. The mechanical properties were also evaluated and the results showed that Composition C2 presented compressive strength superior to 35 MPa at 56 days, showing no significant loss in compressive strength with the addition of this waste.

Key words: waste, foundry sand, concrete blocks, toxicity, mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de fundição utilizando areia na confecção dos moldes.....	22
Figura 2 - Representação esquemática do teste subagudo utilizando cebolas.....	37
Figura 3 - Distribuição granulométrica do resíduo.....	40
Figura 4 - Difratoograma de raios X do resíduo: Q – quartzo.....	41
Figura 5 - Degradação da resina fenólica.	42
Figura 6 - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier. ..	43
Figura 7 - Efeito do teor de areia de fundição residual e do tempo de cura na resistência à compressão das lajotas obtidas: (a) 28 dias; (b) 56 dias; (c) 91 dias.	47
Figura 8 - Comprimento médio e desvio padrão das raízes de <i>Allium cepa</i> para os diferentes tratamentos.....	511

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições das misturas empregadas na produção das lajotas.	34
Tabela 2 - Análise química do resíduo de areia de fundição.	39
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do resíduo.	40
Tabela 4 - Massa obtida por extração.	43
Tabela 5 - Análise estatística (ANOVA) considerando o efeito da idade e da percentagem de substituição de areia em concreto ($p = 0,604$).	48
Tabela 6 - Fator de toxicidade das <i>Daphnia magna</i> expostas às lajotas com diferentes teores de substituição de resíduo de areia de fundição.	49
Tabela 7 - Testes de toxicidade aguda do resíduo de areia de fundição em minhocas.	50
Tabela 8 - Resultados de toxicidade dos corpos de prova com raiz de cebola.	51
Tabela 9 - Análise de variância p (semelhança 95%).	522
Tabela 10 - Comparações pareadas de Tukey: Q diagonal inferior, p (semelhança 95%) diagonal superior.	52
Tabela 11 - Resultados comparativos dos testes de toxicidade.	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO	21
3.2 RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO E O MEIO AMBIENTE	23
3.3 CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ..	24
3.4 PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L)	26
3.5 VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS	27
3.6 EMPREGO DO RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO.....	28
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	33
4.1.1 Análise granulométrica.....	33
4.1.2 Difratometria de raios x.....	33
4.1.3 Análise química	34
4.1.4 Caracterização da fração orgânica presente no resíduo	34
4.1.5 Caracterização dos extratos.....	35
4.1.6 Caracterização ambiental	35
4.2 PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	36
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LAJOTAS OBTIDAS	36
4.3.1 Ensaio de resistência à compressão.....	36
4.3.2 Ensaio de toxicidade	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	39
5.1.1 Análise química	39
5.1.2 Análise do tamanho de partícula.....	40
5.1.4 Extração de fração orgânica.....	42
5.1.5 Caracterização ambiental	44
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LAJOTAS OBTIDAS	46
5.3 ENSAIO DE TOXICIDADE	49
5.3.1 Ensaio de toxicidade do resíduo de areia de fundição.....	49
5.3.2 Ensaio de toxicidade dos corpos de prova.....	49
5.3.2.1 Ensaio de toxicidade com <i>Daphnia magna</i>	49
5.3.2.2 Ensaio de toxicidade aguda em minhocas	50
5.3.3.3 Ensaio de toxicidade com raiz de cebola	50
6 CONCLUSÃO	55
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

ANEXO - Relatório de Ensaio n. 26/2013.....	67
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

A fundição consiste em um processo de fabricação onde um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado em um molde que contém uma cavidade com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida. O método de moldagem em areia é o mais utilizado em todo mundo para a produção de peças fundidas. Estima-se que mais de 80% das peças produzidas utilizam moldes feitos de areia aglomerada, cuja composição é dada por um material granular refratário (areia base), água e aditivos orgânicos e/ou bentonitas como ligantes (ABIFA, 2008).

Um dos problemas inerentes a esse processo é o fato de que, após um determinado número de repetições, a mistura a base de areia perde as propriedades necessárias para a fabricação de outros moldes, gerando, desse modo, significativa quantidade de resíduo.

De acordo com McIntyre et al. (1992), a produção de uma tonelada de metal fundido gera, aproximadamente, uma tonelada de resíduo. Dados da Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (2012) indicam que a produção de fundidos no Brasil chegou a 3,3 milhões de toneladas no ano de 2011. Assim, constata-se que, só no ano de 2012, a indústria brasileira de fundição gerou aproximadamente três milhões de toneladas de resíduo.

O resíduo de areia de fundição é classificada como resíduo Classe II A (Resíduos não Inertes) de acordo com a Norma ABNT NBR 10004:2004. A legislação ambiental brasileira determina que estes resíduos devam ser depositados em aterros industriais ou incinerados. Tal necessidade gera um sério problema ambiental, devido não apenas ao elevado volume produzido, mas também às substâncias tóxicas neles encontradas, visto que a areia fica contaminada por elementos e compostos químicos, tais como: arsênio, cádmio, chumbo, fenóis, mercúrio, sódio, entre outros (KLINSKY, 2008). Além do problema ambiental, o grande volume de resíduos também preocupa os empresários do setor devido ao elevado custo de gestão e destinação dos mesmos.

Nesse contexto, as empresas do setor de fundição têm buscado alternativas para reaproveitar o resíduo de areia de fundição, o que diminuiria o custo de disposição do resíduo e implicaria em um menor impacto ambiental.

Uma alternativa largamente empregada mundialmente é a produção de concreto, tornando-o não apenas mais econômico, mas

também ajudando a reduzir os problemas de disposição (SIDDIQUE, SINGH, 2011). Outra alternativa em potencial para o reaproveitamento da resíduo de areia de fundição é utilizá-la na produção de artefatos cimentícios, tendo em vista que os agregados ocupam cerca de 75% do seu volume. Destaca-se que, além de eliminar a necessidade de disposição em aterros industriais, o uso do resíduo de areia de fundição em artefatos cimentícios traz um benefício a mais para o meio ambiente, pois evita que um volume importante (da ordem de milhões de metros cúbicos) de areia sejam extraídos de cavas e rios.

É importante destacar que a Resolução CONSEMA nº. 011, de 26 de agosto de 2008, estabelece critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural. Esta resolução, entretanto, está sendo modificada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito da adição de resíduo de areia de fundição no comportamento mecânico e toxicológico de artefatos de cimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos:

- Determinar as características físico-químicas do resíduo de areia de fundição;
- Preparar composições cimentícias para estudo com diferentes teores de resíduo de areia de fundição;
- Fazer a caracterização mecânica dos corpos de prova obtidos;
- Fazer a caracterização toxicológica dos corpos de prova obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

A areia tem sido usada há muito tempo para a confecção de moldes para a conformação de metais fundidos. Os motivos são vários: estão prontas para serem usadas, têm baixo custo, são altamente refratárias e facilmente aglutináveis quando misturadas com argilas ou outros aditivos orgânicos ou inorgânicos.

A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de fundição, destacando-se os pontos de geração deste rejeito (resíduo de areia de fundição).

O material mais utilizado como areia base para confecção de misturas destinadas à produção de moldes para fundição é o quartzo (SiO_2), em função da existência de grandes reservas deste material na natureza. Quanto maior for o teor de quartzo na areia, maior será a refratariedade desta. O nível de refratariedade exigido de uma areia de moldagem depende do metal que se deseja vaziar.

A areia por si só não tem resistência mecânica necessária e suficiente para formar o molde no qual será vazado o metal líquido. Essa propriedade é conferida por um aglomerante que pode ser orgânico ou mineral.

Segundo Mariotto (2000), estima-se que mais de 80% dos produtos fundidos sejam fabricados utilizando-se moldes confeccionados com areia aglomerada.

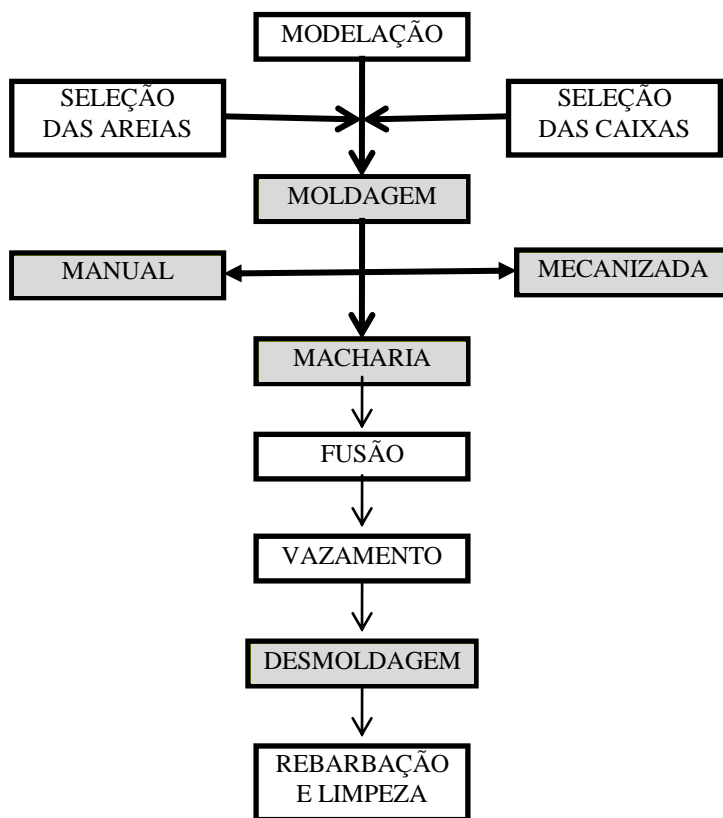
No processo de fundição, a areia é denominada de agregado base ou simplesmente base. Além do material base, as misturas de moldagem são compostas também, dependendo do método, de aglomerantes que podem ser orgânicos ou inorgânicos, água e aditivos. Entre os aglomerantes orgânicos se têm: óleos de secagem (óleos de linhaça, mamona, oiticica), farinhas de cereais (dextrina, mogul e breu) e produtos sintéticos (resinas furânicas e fenólicas).

Uma das composições empregadas contém 85-95% em peso de areia de alta qualidade, 4-10% de bentonita como aglutinante, 2-10% de carvão para melhorar o acabamento da superfície do molde e 2-5% de água (SIDDIQUE, SINGH, 2011).

Os ligantes inorgânicos principais são: argila, cimento Portland e silicato de sódio; dentre esses ligantes, os mais usuais são as argilas, sendo mais usada a bentonita, por apresentar características mais favoráveis para esta finalidade. Dentre os aglomerantes sintéticos, os

mais usuais são as resinas sintéticas e, dentre estas, a fenólica é a mais utilizada por ter preço mais baixo.

Figura 1 - Fluxograma do processo de fundição utilizando areia na confecção dos moldes.



Fonte: Dados do pesquisador.

O reaproveitamento do resíduo de areia de fundição se faz necessário para ser evitada a deposição inadequada desses resíduos e também porque essa atividade é grande consumidora de insumos naturais. Desta forma, conseguir-se-ia minimizar o uso destes recursos e contribuir-se-ia para a diminuição da poluição do meio ambiente.

A reutilização do resíduo pode se dar na própria indústria de fundição, na chamada “Reciclagem Primária”, ou externamente, com a “Reciclagem Secundária”, onde o resíduo serve como matéria-prima para outra atividade que não seja a de fundição (KLINSKY, 2008). Grande parte das indústrias de fundição já executa a reciclagem primária, sendo a reciclagem mecânica a mais utilizada, seguida da reciclagem térmica. Entretanto, com a continuidade dos ciclos, a granulometria do resíduo de areia de fundição fica cada vez menor, chegando a um estágio em que não mais se adapta ao processo de fabricação dos moldes, devendo ser descartada.

O resíduo de areia de fundição descartada pode ser reutilizada em várias aplicações como alternativa para evitar o envio para aterros controlados. As opções de reutilização estão bem estabelecidas na Inglaterra, na zona do euro e na América do Norte. As opções de reutilização incluem: fabricação de cimento, asfalto, concreto, tijolos e material de preenchimento para certas aplicações de construção. Algumas dessas alternativas estão começando a ser adotadas na Índia, mas ainda está em fase inicial. Exemplos de outros países mostram não ser apenas melhor para o meio ambiente, mas também rentável para a fundição usar a areia de forma alternativa. Estas fundições tem significativamente reduzido o volume de resíduo de areia de fundição depositado em aterros e, inclusive, ajudado a reduzir o custo total de transporte (SIDDIQUE et al., 2011).

Além disso, Siddique et al. (2011) cita que, no Brasil, o resíduo de areia de fundição pode ser utilizado na reciclagem secundária, principalmente na área de construção civil, como por exemplo:

- na fabricação de pavimentos cimentícios;
- na fabricação de tijolos;
- na fabricação de tubos;
- como substituto de agregado fino no concreto asfáltico;
- na construção de aterros de rodovias.

3.2 RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO E O MEIO AMBIENTE

A atual e sempre crescente demanda por produtos industrializados pela sociedade moderna tem como consequência, através de todos os processos produtivos exigidos na confecção destes produtos, a geração de resíduos. Dentro destas condições, torna-se vital

então, principalmente por questões ambientais, a destinação adequada para todos os tipos de resíduos gerados nestes processos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), (Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010), determina que estes resíduos sólidos, gerados durante os processos produtivos industriais, devem ser depositados em aterros industriais ou incinerados. Na prática, essa legislação fez com que muitas empresas investissem em tecnologias mais limpas, ou seja, em processos produtivos que geram menos resíduos.

Contudo, grandes volumes de resíduos sólidos continuam sendo gerados e ainda preocupam os diversos setores da sociedade, devido principalmente às leis de responsabilidade ambiental e ao custo relativamente elevado para a gestão e destinação dos resíduos (SILVA; CHEGATTI, 2007).

Segundo Silva e Chegatti (2007), as areias de fundição representam um dos maiores volume de resíduos sólidos industriais.

Diante deste contexto de preservação ambiental e de viabilidade econômica, a indústria da construção civil tem ocupado papel de destaque por demandar grandes quantidades de materiais, apresentando-se, portanto, como potencial consumidor de resíduos sólidos industriais e urbanos, e com possível aplicação em vários setores da construção civil, como confecção de tijolos cerâmicos, argamassas para confecção de blocos, argamassas de revestimento, entre outros (JUNKES, 2002).

3.3 CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

O estudo da reutilização do resíduo de areia de fundição como insumo dentro da construção civil leva inicialmente ao conhecimento das normas brasileiras relativas à caracterização deste resíduo sólido industrial. Então, essencialmente, estas normas consistem em determinar as características químicas e algumas características físicas destes resíduos, por meio da avaliação dos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, gerando manuseio e destinos adequados aos mesmos (JUNKES, 2002).

Desta forma, para estes fins, são previstas as seguintes normas:

a) ABNT NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos:

Esta norma classifica os resíduos quanto a sua potencialidade de agressão ao meio ambiente e à saúde pública. Todo resíduo é classificado de acordo com as suas características físicas, químicas e infectocontagiosas. Sendo assim, são definidos três grupos de resíduos:

- Classe I (Resíduos Perigosos) - são aqueles que apresentam riscos à saúde pública em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II A (Resíduos não Inertes) - são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B (Resíduos Inertes) - são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isto significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo.

Os resíduos compreendidos nas Classes II A e II B podem ser incinerados ou depositados em aterros sanitários, desde que preparados para tal fim e que estejam submetidos aos controles e monitoramento ambientais. Os resíduos compreendidos na Classe I somente podem ser depositados em aterros construídos especialmente para tal fim, ou devem ser queimados em incineradores especiais.

b) ABNT NBR 10005:2004 - Lixiviação de Resíduos:

O ensaio de lixiviação referente à Norma ABNT NBR 10005:2004 é utilizado para a classificação de resíduos industriais, pela simulação das condições encontradas em aterros. A lixiviação classifica um resíduo como tóxico ou não, seja Classe I ou não.

c) ABNT NBR 10006:2004 - Solubilização de Resíduos:

O ensaio de solubilização previsto na Norma ABNT NBR 10006:2004 é um parâmetro complementar ao ensaio de lixiviação na classificação de resíduos industriais. Este ensaio tem por objetivo a classificação dos resíduos como inerte ou não, isto é, Classe III ou não.

d) ABNT NBR 10007:2004 - Amostragem de Resíduos:

Esta norma é referente à coleta de resíduos e estabelece as linhas básicas que devem ser observadas, antes de se retirar qualquer amostra, com o objetivo de definir o plano de amostragem (objetivo de amostragem, número e tipo de amostras, local de amostragem, frascos e preservação da amostra).

Assim, as normas apresentadas anteriormente são utilizadas pelos diversos setores industriais para o tratamento e destinação dos resíduos provenientes de suas atividades, principalmente devido aos aspectos de ordem econômica ou de responsabilidade ambiental.

3.4 PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L)

O conceito de Produção Mais Limpa (P+L) foi definido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) no início da década de 1990 como sendo a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva integrada aos processos, produtos e serviços para aumentar a eco-eficiência e reduzir os riscos ao homem e ao meio ambiente. Mais tarde, o mesmo órgão, já no final da década de 90, lançou a declaração internacional sobre P+L (PNUMA, 1999).

A P+L aplica-se a (CETESB, 2005):

- processos produtivos: inclui conservação de recursos naturais e energia, eliminação de matérias-primas tóxicas e redução da quantidade e da toxicidade dos resíduos e emissões;
- produtos: envolve a redução dos impactos negativos ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a sua disposição final; e
- serviços: estratégia para incorporação de considerações ambientais no planejamento e entrega dos serviços.

A P+L é uma ferramenta que contribui de maneira bastante acessível e prática na prevenção de impactos negativos ao meio ambiente, por promover o melhor gerenciamento dos recursos energéticos e minimizar os resíduos produzidos, podendo gerar lucros com as economias alcançadas. Ela surgiu em 1991, num programa da UNIDO/UNEP, como uma abordagem intermediária entre a Produção Limpa do *Greenpeace* e a diminuição de resíduos da *Environmental Protection Agency* – EPA (Centro Nacional de Tecnologias Limpas, 2003b).

Teve suas origens estimuladas pela Conferência de Estocolmo em 1972, conforme Barbieri (2004), pela definição de tecnologia limpa, que consiste em disseminar menos poluição ao meio ambiente, gerar menos resíduos e consumir menos recursos naturais.

De acordo com o Centro Nacional de Tecnologias Limpas – CNTL (2003b), a P+L constitui no aproveitamento contínuo dos recursos econômicos, ambientais e tecnológicos. Desta forma pode-se

aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia através da não geração, diminuição ou reciclagem de resíduos gerados em todos os setores produtivos.

Segundo Moura et al. (2005), as maiores dificuldades para a implantação da P+L, de um modo geral, acontecem em função: da resistência à modificação; da compreensão errônea (ausência de informação sobre a técnica e a relevância oferecida ao ambiente natural); da não existência de políticas nacionais que ofereçam suporte às atividades de P+L; de empecilhos econômicos (alocação indevida dos custos ambientais e investimentos); e de empecilhos técnicos (novas tecnologias).

Frente ao exposto, por sua abordagem preventiva à geração de resíduos (buscando prioritariamente a redução nas fontes geradoras) a P+L aponta enfoque especial aos microprocessos de uma organização, tendo como um de seus pontos mais fortes a análise técnica, ambiental e econômica vinculada à detecção das oportunidades de melhoria, fomentando assim a sustentabilidade e configurando-se, portanto, como uma importante ferramenta de apoio à Gestão Ambiental das organizações.

3.5 VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

No sentido de se promover o melhor aproveitamento do valor contido em um resíduo industrial, ou melhor, um subproduto, a metodologia de valorização de resíduos foi desenvolvida (RAUP-PEREIRA, 2006) e vem sendo empregada com sucesso a vários resíduos.

Ela consiste de vários fatores, tais como: a disponibilidade contínua, a quantidade produzida e grau de pureza; as condições de mercado; os custos e a disponibilidade de transporte; o custo inerente ao processo de transformação num material reutilizável; o custo de deposição de resíduos integrados ao processo; e também os prejuízos ambientais que advém da sua reutilização (PEREIRA, 2006).

Tornando-se difícil sob o ponto de vista técnico-econômico buscar-se a implementação integral desta metodologia a este resíduo, ganha importância a aplicação do mesmo na forma da reciclagem e reaproveitamento. Mesmo não se tratando de uma aplicação mais nobre, seu reaproveitamento representa um aumento do seu valor.

3.6 EMPREGO DO RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO

O resíduo de areia de fundição tem sido empregado na obtenção de diferentes produtos, sobretudo relacionados à construção civil, por meio da substituição parcial de areia natural.

Reddi et al. (1996) fizeram uma análise comparativa sobre a estabilização de compostos fenólicos existentes em algumas areias de fundição residuais, empregando quatro tipos diferentes de ligantes (cimento, cinza volante, caulinita e bentonita). A resistência mecânica e a lixiviação de misturas estabilizadas foram analisadas para avaliar o potencial estabilizante relativo de cada um dos ligantes. Eles concluíram que a resistência à compressão de resíduo de areia de fundição estabilizada diminuiu quando a proporção de substituição aumentou nas misturas e a resistência foi aumentada relativamente mais rapidamente com cinza volante do que com cimento. Em geral, o resíduo de areia de fundição aglutinada por argila reduziu a resistência de misturas estabilizadas mais do que as areias aglutinadas por resina, devido à absorção de água pela argila.

Khatib e Ellis (2001) estudaram a influência de três tipos de resíduo de areia de fundição (a areia branca fina, sem a adição de argila e carvão, areia de fundição antes da moldagem, e da areia de fundição após a moldagem) como substituição parcial do agregado fino na resistência à compressão do concreto até a idade de 90 dias. A areia padrão foi parcial ou totalmente substituída (0, 25, 50, 75 e 100%) por estas areias. Eles concluíram que com o aumento do nível de substituição de areia padrão pelo resíduo de areia de fundição, a resistência do concreto diminuiu e aumento na resistência não foi observado a baixos níveis de substituição (inferior a 50%).

Naik et al. (2003) investigaram o efeito da adição de resíduo de areia de fundição, cinza volante e cinza de fundo da combustão do carvão na resistência à compressão de tijolos, blocos e lajotas. As taxas de substituição, em massa, de areia por resíduo de areia de fundição foram de 25 e 35%. Para tijolo e lajotas, a resistência à compressão foi medida nas idades de 5, 28, 56, 91 e 288 dias, enquanto para os blocos foi feito nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias. Eles concluíram que a substituição parcial de areia por resíduo de areia de fundição em lajotas causou considerável redução na resistência.

Naik et al. (2004) investigaram o efeito do resíduo de resíduo de areia de fundição sobre a resistência à compressão de tijolos de concreto moldados a úmido e lajotas. Eles concluíram que tanto os tijolos quanto

as lajotas, ambos moldados a úmido, atingiram a resistência à compressão mínima requerida, respectivamente, pela ASTM C 55 e ASTM C 936, e poderiam ser produzidas com concreto contendo resíduo de resíduo de areia de fundição.

Watanabe (2004) realizou um estudo da viabilidade do uso de resíduo de areia de fundição como matéria-prima na fabricação de pavimentos de concreto. No estudo foram efetuados ensaios de resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura para avaliar a influência do processo na resistência mecânica dos materiais. Foram efetuados também os ensaios de lixiviação, análise de massa bruta e solubilização para avaliar o comportamento ambiental dos pavimentos fabricados com resíduo. Ele concluiu que é possível utilizar o resíduo de areia de fundição como agregado para confecção de pavimentos de concreto. No processo de vibração, a resistência à compressão tende a diminuir com o aumento da concentração do resíduo de areia de fundição. Para os pavimentos sem resíduo, o valor da resistência média à compressão foi de 15,5 MPa. Para os pavimentos com 25% de incorporação de resíduo de areia de fundição em substituição à areia comum, a resistência média à compressão foi de 12,4 MPa aos 30 dias de cura, ou seja, 20% inferior. Pelo processo de vibro-compressão, os resultados dos ensaios mecânicos com a incorporação de 25% de resíduo de areia de fundição em substituição à areia comum mostraram valores mais elevados. Para os pavimentos sem resíduo, o valor da resistência média à compressão foi de 25,4 MPa. Para os pavimentos com 25% de incorporação de resíduo de areia de fundição em substituição à areia comum, a resistência média à compressão atingiu 32,2 MPa aos 30 dias de cura. Aos 90 dias de cura a resistência foi de 29,7 e 37,5 MPa, respectivamente.

Biolo (2005) analisou os aspectos tecnológicos e ambientais do reuso do resíduo de areia de fundição, proveniente do processo de moldagem à verde, na produção de blocos cerâmicos. Concluiu que a utilização de até 10% de areia verde na massa cerâmica não causou consideráveis efeitos negativos sobre sua qualidade, seja em termos de absorção de água, porosidade, retração linear e resistência mecânica. Também não foram detectados poluentes em grandes concentrações nos extratos de lavagem das emissões gasosas. Com a adição de areia verde, não houve elevação na concentração destes, sendo o fenol e os surfactantes não detectados.

Carnin (2008) analisou a viabilidade técnica e ambiental do resíduo de areia verde de fundição usada como agregado em misturas

asfálticas. A pesquisa demonstrou que o encapsulamento dos resíduos com a massa asfáltica se torna um processo eficiente na estabilização dos metais presentes em excesso. Ela demonstrou que as misturas asfálticas contendo resíduo de areia verde de fundição apresentaram propriedades adequadas para a camada de revestimento asfáltico, referente aos parâmetros obtidos no ensaio Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência. Ela ainda afirmou que nos ensaios ambientais realizados em corpos de prova com areia convencional e resíduo de areia verde de fundição, os mesmos não apresentam riscos ao meio ambiente.

Siddique et al. (2009) investigaram o efeito de resíduo de areia de fundição como substituição parcial do agregado fino na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do concreto. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade das misturas de concreto feita com e sem resíduo de areia de fundição foi determinada aos 7, 28, 56, 91 e 365 dias de cura. Eles concluíram que houve um aumento insignificante na resistência à compressão de misturas de concreto com a inclusão de resíduo de areia de fundição como substituição parcial de areia padrão. Aos 28 dias, a mistura de controle (0% de resíduo de areia de fundição) atingiu uma resistência à compressão de 28,5 MPa, enquanto que as misturas contendo 10, 20 e 30% de resíduo de areia de fundição alcançaram resistências à compressão de 29,7, 30,0 e 31,3 MPa, respectivamente. O aumento na resistência à compressão, com a inclusão de resíduo de areia de fundição, poderia provavelmente ser devido ao fato de que o resíduo de areia de fundição era mais fina do que a areia padrão, que resultou em uma matriz de concreto mais densa e também devido ao teor de sílica presente no resíduo de areia de fundição. Javed e Lovell (1994) relataram resultados semelhantes, concluindo que o resíduo de areia de fundição poderia ser adequadamente utilizado como substituição parcial dos agregados finos sem afetar o desempenho de concreto asfáltico.

Guney et al. (2010) analisou a influência da inclusão de resíduo de areia de fundição como substituição parcial de agregados finos na resistência à compressão até a idade de 56 dias. Estes agregados finos foram parcialmente substituídos por 0, 5, 10 e 15% de resíduo de areia de fundição. Observou-se que o concreto com 10% de substituição de areia pelos resíduos de resíduo de areia de fundição apresentou a maior resistência à compressão na idade de 56 dias. A resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de resíduo de areia de fundição.

O concreto com 10% do resíduo de fundição pode indicar a quantidade ótima de substituição de resíduo de areia de fundição.

Ettxeberria et al. (2010) estudaram o efeito de dois tipos de areias de fundição residuais na resistência à compressão aos 28 dias do concreto. Areia de fundição química e areia de fundição verde foram usadas. A proporção em peso da mistura cimento:areia de fundição:areia natural:agregado grosso no concreto foi 1:1,5:1,33:3,83 por metro cúbico de concreto, com relação água-cimento de 0,61. Os resultados dos testes indicaram que o concreto com areia de fundição química alcançou resistência aos 28 dias de 28 MPa, considerando o valor de 25 MPa para o concreto de areia de fundição verde.

Siddique et al. (2011) apresentaram resultados do projeto de misturas de concreto elaborados com resíduo de areia de fundição descartável como substituição parcial de agregados finos. Os resultados indicaram que as composições testadas apresentaram resistência à compressão em torno de 30 MPa para 90 dias nas composições estudadas, indicando que este subproduto industrial pode produzir concretos com suficiente resistência à compressão.

Silva et al. (2010) estudaram a influência do emprego de resíduo de areia de fundição nas propriedades do estado fresco e endurecido de misturas cimentícias. Eles concluíram que o emprego da areia proveniente do processo de fundição exerce influência significativa no desempenho das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Todavia, constatou-se que esta influência é função da composição do resíduo utilizado. Os testes em argamassas mostraram que parece haver uma influência significativa do pó de carvão, comparado com o Na_2SiO_3 e CO_2 , no que diz respeito à resistência à compressão. Quando a areia empregada possui resíduos de material metálico, essa influência é ainda maior, resultando em expansão excessiva e redução acentuada na resistência à compressão, se comparada com uma mistura de referência. Em função dos resultados apresentados, notou-se que o emprego de resíduo de areia de fundição para a produção de concreto resultou em ocorrência de reações expansivas. Tais reações causaram fissuração na estrutura do material e contribuíram para uma redução substancial na resistência à compressão do mesmo. Assim sendo, se somados os efeitos expansivos com a ocorrência de fissuração e queda de resistência do material, concluíram que a aplicação de misturas constituídas de resíduo de areia de fundição seria arriscada quanto aos requisitos de durabilidade. Entretanto, as conclusões obtidas neste trabalho não puderam ser generalizadas, pois

outros trabalhos obtiveram resultados satisfatórios, que comprovaram a possibilidade do emprego deste resíduo em substituição parcial aos agregados na produção de concreto. Assim sendo, em todos os casos é aconselhável a realização de ensaios preliminares com o objetivo de verificar os efeitos gerados pelo emprego do resíduo de areia de fundição.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deste trabalho é dividido em três etapas básicas:

- Caracterização do resíduo;
- Preparação das composições;
- Caracterização das lajotas obtidas.

O resíduo de areia de fundição utilizada neste trabalho foi proveniente do processo de fundição da Empresa Coopermetal de Criciúma/SC. O material foi utilizado conforme recebido, sem ser submetido a qualquer tipo de beneficiamento.

O planejamento experimental empregado, apresentado na Tabela 1, foi baseado no delineamento de misturas com restrições. As composições testadas correspondem aos vértices, pontos centrais das arestas e pelo centróide do polígono formado pelas restrições, ou seja, cimento Portland CP IV de 13 a 22%, areia verde de 34 a 77% e resíduo de areia de fundição de 0 a 38,5%, este último representando até 50% de substituição da areia verde. Todos os teores em peso.

As respostas observadas foram a resistência à compressão e a toxicidade. O objetivo foi criar uma superfície de resposta e poder atingir o ponto ótimo do teor de cimento e de areia, obtendo-se um valor de resistência à compressão mínima de 35 MPa, com objetivo de atender o limite inferior estabelecido em Norma ABNT NBR 9781:2013, além dos parâmetros ambientais de controle.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

4.1.1 Análise granulométrica

Para determinação da distribuição granulométrica, foram utilizadas 300 g de resíduo de areia de fundição em um agitador eletromagnético (10 min em frequência de 6 Hz) com peneiras de 32 (500 μm) a 115 mesh Tyler (125 μm).

4.1.2 Difractometria de raios x

As fases cristalinas presentes no resíduo foram determinadas em um difratômetro de raios X Shimadzu, modelo LABX XRD-6000, com

30 kV e corrente de 30 mA. Foi empregado um tubo de cobre (radiação $\text{CuK}\alpha$) e faixa de varredura 2θ de 5 a 85° .

Tabela 1 - Composições das misturas empregadas na produção das lajotas.

Misturas	Composição unitária - C:An:Af:P ¹	Composição (% em peso)			
		C	An	Af	P
M1 – C1 ²	1:3,05:0,00:0,45 – 0% ³	22	68	0	10
M2 – C1	1:2,30:0,75:0,45 – 25%	22	51	17	10
M3 – C1	1:1,52:1,52:0,45 – 50%	22	34	34	10
M4 – C2	1:4,40:0,00:0,60 – 0%	17	73	0	10
M5 – C2	1:3,30:1,10:0,60 – 25%	17	55	18	10
M6 – C2	1:2,20:1,20:0,60 – 50%	17	36,5	36,5	10
M7 – C3	1:5,75:0,00:0,75 – 0%	13	77	0	10
M8 – C3	1:4,31:1,44:0,75 – 25%	13	58	19	10
M9 – C3	1:2,87:2,87:0,75 – 50%	13	38,5	38,5	10

¹ Cimento Portland CP IV:areia 1 (verde):areia 2 (resíduo):pedrisco

² Igual à composição ou consumo de cimento

³ Porcentagem de substituição de areia verde pelo resíduo de areia de fundição

Fonte: Dados do pesquisador.

4.1.3 Análise química

A composição química do resíduo de areia de fundição foi determinada em um espectrômetro de fluorescência de raios X PHILIPS PW 2400. A análise físico-química para determinação de fenóis totais apontou que o resíduo de areia de fundição apresentou resultado menor que 0,1 mg/kg. Esse resultado indica a possibilidade do uso do resíduo de areia de fundição para confecção de artefatos cimentícios.

4.1.4 Caracterização da fração orgânica presente no resíduo

A técnica de extração contínua foi empregada para a determinação da composição dos componentes orgânicos presentes no resíduo de areia de fundição. Neste estudo foram utilizados diferentes solventes orgânicos, a saber: Diclorometano (CH_2Cl_2), Acetato de Etila ($\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$), Hexano (C_6H_6) e Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Este método era composto das seguintes etapas:

a) Secagem

A secagem foi executada a 85 °C por 24 h em estufa de laboratório. Usou-se 600 g de resíduo com umidade inicial de 0,67%.

b) Calcinação

Para a calcinação foram utilizadas amostras com 10 g de resíduo de areia de fundição seca. As amostras foram calcinadas a 1000 °C por 2 h em mufla de laboratório.

c) Extração dos compostos orgânicos por solventes

Para a extração foram utilizadas amostras com 20 g de resíduo de areia de fundição seca. Foram executadas quatro extrações em equipamento *Soxhlet* com diferentes solventes: diclorometano (CH_2Cl_2), acetato de etila ($\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$), hexano (C_6H_6) e etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Para cada solvente se fez triplicata da extração. O extrator *Soxhlet* foi montado em uma capela sobre uma manta de aquecimento. Após a extração, juntou-se as triplicatas do extrato de cada solvente empregado, colocou-se em um bquer de 1 L para concentração do extrato em uma chapa de aquecimento. Cada bquer teve sua massa pesada individualmente e anotada. A seguir, adicionou-se o respectivo solvente empregado na extração aos bqueres para ressolubilizar os conteúdos extraídos e então transferidos para recipientes pequenos de vidro, deixando-os com um pequeno espaço de sua tampa aberto para que possibilitasse a volatilização do restante do solvente presente em cada amostra.

4.1.5 Caracterização dos extratos

As amostras extraídas pelos diferentes tipos de solventes foram analisadas por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR (Shimadzu IR Prestige – 21).

4.1.6 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental do resíduo foi realizada de acordo com as Normas ABNT NBR 10004:2004, 10005:2004, 10006:2004 e 10007:2004.

As metodologias utilizadas pelo laboratório são baseadas na norma SW 846-3050B (USEPA 1986).

4.2 PREPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

Os corpos de prova foram confeccionados na fábrica de lajotas localizada no presídio Santa Augusta, em Criciúma (SC). As misturas foram realizadas em uma betoneira e, em seguida, descarregadas em uma mesa vibratória contendo os moldes para conformação dos corpos de prova (lajotas). Foram preparados ao menos cinco corpos de prova em cada uma das condições experimentais. Em seguida, os corpos de prova foram devidamente acondicionados para o processo de cura a 28, 56 e 91 dias.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LAJOTAS OBTIDAS

4.3.1 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão axial dos corpos de prova nas idades de 28, 56 e 91 dias foi determinada conforme Norma ABNT NBR 9781:2013 em uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC de 200 ton.

4.3.2 Ensaio de toxicidade

Por questões ambientais e baseadas no fato de que o resíduo de areia de fundição é classificado como resíduo sólido, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio para classificação segundo Norma ABNT NBR 10004:2004, para determinar os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública que os mesmos possam apresentar. Para os testes de toxicidade, utilizou-se o solubilizado obtido de acordo com a Norma ABNT NBR 10007:2004 a partir dos corpos de prova com idade de 91 dias.

A) Utilizando *Daphnia magna*

Foram realizados testes de toxicidade aguda, conforme a portaria Nº 017-FATMA (Metodologia de Análise ABNT NBR 12713:2009).

B) Teste agudo de letalidade utilizando minhocas (*Eisenia foetida*)

Realizou-se o teste agudo com minhocas da espécie *Eisenia foetida*, baseado na ISO (2002). Antes do teste, as minhocas ficaram sobre papel filtro umedecido com água destilada por um período de 24 h, para fazer o purgamento do conteúdo intestinal. Os indivíduos de

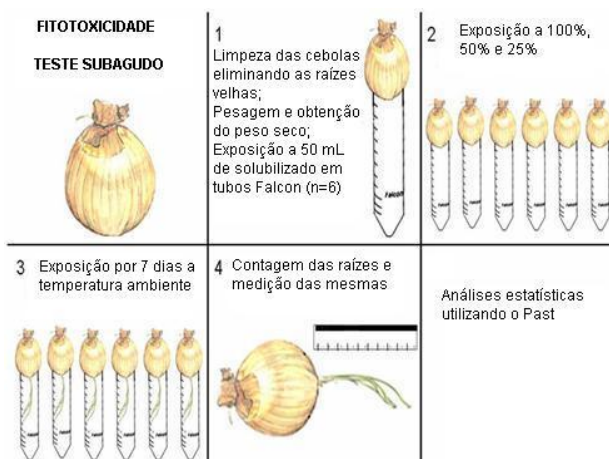
Eisenia foetida foram submetidos à exposição direta ao solubilizado proveniente dos diferentes tratamentos de acordo com a Norma OECD (1984).

C) Utilizando raiz de cebola (*Allium cepa*)

Utilizou-se a metodologia de teste subagudo com bulbos de cebola da espécie *Allium cepa* seguindo a proposição de (FISKESJO, 1985). Antes da exposição das cebolas ao solubilizado foram eliminadas as raízes velhas, conservando o meristema e realizada a pesagem individual de cada bulbo. As cebolas foram expostas em tubos Falcon, com seis repetições para cada tratamento. Foram utilizadas diluições de 100, 50 e 25% do solubilizado de cada estação amostral e um teste em branco utilizando apenas água destilada.

A Figura 2 apresenta um esquema do preparo e execução do teste de inibição do crescimento das raízes das cebolas.

Figura 2 - Representação esquemática do teste subagudo utilizando cebolas.



Fonte: Adaptado de SILVA (2008).

Os testes foram acondicionados na estufa incubadora a 22 °C, com ausência de luz, durante 7 dias. Após este período, foram retiradas e pesadas novamente e foram realizadas as medições do comprimento das raízes em mm. Todos os testes foram estáticos, sendo a reposição de líquido feita diariamente com água destilada.

Os resultados dos testes de toxicidade da cebola foram analisados utilizando-se o software Past[®] (HAMMER et al., 2001). Para verificar a validade estatística das diferenças nos resultados de variação percentual de peso dos bulbos de cebola e crescimento das raízes dos bulbos de cebola, foi utilizado o teste de Análise de Variância (ANOVA) entre grupos. Como forma de identificar quais tratamentos se diferenciavam entre si, foi realizado o teste de Tukey. Foi considerado que os parâmetros com valores de p inferiores a 0,05 são estatisticamente significativos. A comparação dos pesos médios das minhocas entre os diferentes tratamentos foi realizada por meio do teste Chi quadrado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

5.1.1 Análise química

A Tabela 2 apresenta o resultado da análise química do resíduo de areia de fundição. Esta tabela mostra a presença majoritária do elemento silício (96%) na forma de SiO_2 (quartzo), como será confirmado pela difração de raios X, confirmando tratar-se da composição típica de uma areia. Além disso, foram identificados os elementos alumínio, ferro, sódio e titânio. A composição química apresentada na Tabela 2 não totaliza 100% devido, provavelmente, aos teores de sulfatos e cloretos não identificados pela técnica empregada.

Tabela 2 - Análise química do resíduo de areia de fundição.

Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Al_2O_3	0,45	SiO_2	96,12
CaO	0,08	TiO_2	0,11
Fe_2O_3	0,37	BaO	-
K_2O	< 0,05	Cr_2O_3	-
MgO	0,06	PbO	-
MnO	< 0,05	SrO	-
Na_2O	0,19	$\text{ZrO}_2+\text{HfO}_2$	-
P_2O_5	< 0,05	Perda Fogo	0,47

Fonte: Dados do pesquisador.

Importante ressaltar o valor de perda ao fogo (0,47%), provavelmente decorrente da presença de matéria orgânica utilizada como ligante. Entretanto, de acordo com o fornecedor, são adicionados 1,67% de resina e 0,33% de catalisador. Não são utilizadas a bentonita e o carvão, prática comum em fundições de pequeno porte em processos mais antigos. O uso destas duas substâncias seria prejudicial para os artefatos cimentícios, uma vez que são suscetíveis à absorção de água e consequente “inchamento”. O baixo teor de sódio presente também corrobora no sentido do resíduo ser adequada ao processo de fabricação de artefatos cimentícios.

5.1.2 Análise do tamanho de partícula

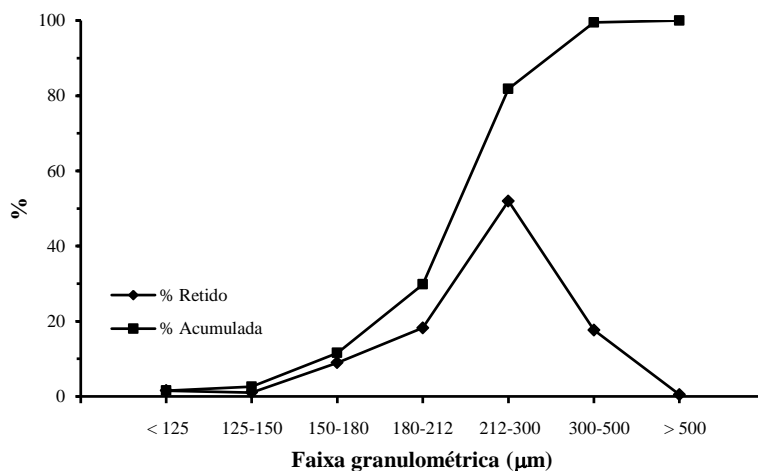
Os resultados da distribuição granulométrica do resíduo de areia de fundição são apresentados na Tabela 3 e na Figura 3.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica do resíduo.

Peneiras (mesh)	1º Ensaio (g)	2º Ensaio (g)	3º Ensaio (g)	Quantidade retida (%)	Quantidade retida cumulativa (%)
32	1,4	1,5	1,7	0,51	0,51
48	54,8	50,7	53,5	17,67	18,18
65	151,6	162,8	153,3	52,00	70,18
80	56,3	52	55,9	18,25	88,43
100	28	25,3	27,5	8,98	97,41
115	3,3	2,8	3,2	1,03	98,44
Passante	4,6	4,8	4,6	1,56	100
Total	300	299,9	299,7	100	

Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 3 - Distribuição granulométrica do resíduo.



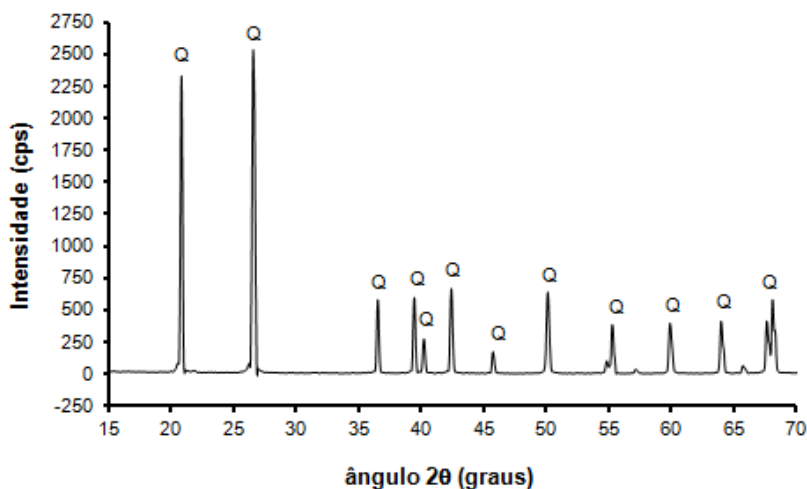
Fonte: Dados do pesquisador.

Os resultados demonstram que a maior parte do material está concentrada na faixa granulométrica de 212 a 300 μm . O diâmetro médio de partícula (d_{50}) poderia ser considerado aproximadamente 226 μm . Outro dado importante é que o acumulado de 90% está nesta mesma faixa, conforme é mostrado na Figura 4. Se analisar a distribuição granulométrica do resíduo utilizado na fabricação de artefatos cimentícios, apresentados nos trabalhos de Silva et al. (2010) e Rocha et al. (2011), percebe-se que as faixas de distribuição granulométrica apresentam aproximadamente os mesmos percentuais. Estes resultados são importantes na medida em que podem ter correlação com a resistência dos artefatos cimentícios produzidos anteriormente por estes autores.

5.1.3 Difratometria de raios x

O difratograma de raios X mostrado na Figura 4 indica a presença de uma única fase cristalina, identificada como quartzo (SiO_2 , cartão JCPDS n. 1 46-1045). Esse resultado está em concordância com o apresentado na análise química. Os demais elementos presentes ou estão contidos em uma fase amorfa ou formando uma ou mais fases cristalinas em quantidade insuficiente para serem detectadas por esta técnica.

Figura 4 - Difrátograma de raios X do resíduo: Q – quartzo.

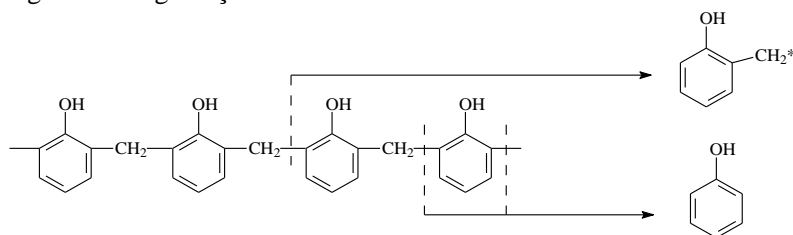


Fonte: Dados do pesquisador.

5.1.4 Extração de fração orgânica

Primeiramente foi determinado o teor de material volátil, submetendo-se 3 amostras do resíduo seco à calcinação. O teor médio de voláteis foi de $1,21 \pm 0,05\%$ associado à presença de substâncias orgânicas existentes na resina fenólica empregada. No estudo apresentado por Trick e Saliba (1995), a pirólise da resina fenólica envolve a liberação de cresol ou fenol que, na sequência da degradação, desidrata e libera hidrocarbonetos. Portanto, o resíduo identificado na calcinação do resíduo de areia de fundição usado neste trabalho poderia ser fenol, cresol ou hidrocarbonetos. A Figura 5 apresenta os produtos de degradação possíveis de serem encontrados neste processo.

Figura 5 - Degradação da resina fenólica.



Fonte: Dados do pesquisador.

Para identificar as substâncias presentes na resina fenólica foi empregado método de extração orgânica por extração com solventes. Para isto, no processo de extração, foram utilizados solventes com diferentes polaridades, a saber: etanol, acetato de etila, diclorometano e hexano. A Tabela 4 apresenta as massas extraídas por cada solvente empregado.

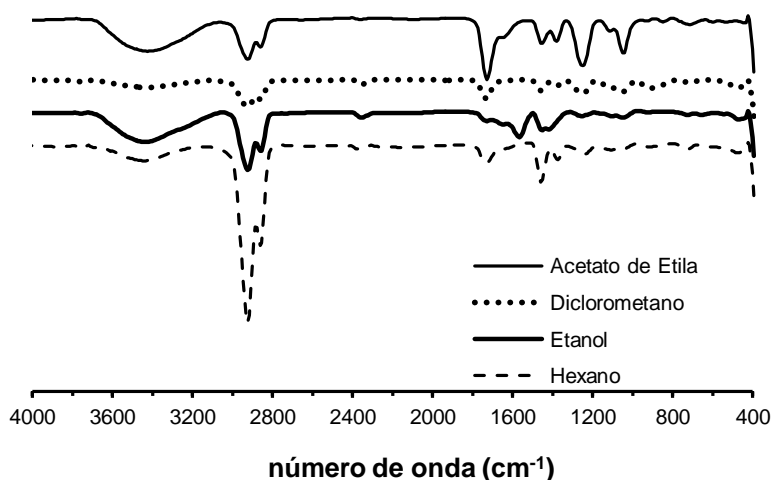
Pode ser observado que o teor do extrato foi inferior ao teor de voláteis (orgânicos) identificados na calcinação. Isto pode estar associado à estrutura do material orgânico presente ainda no resíduo. Para tentar identificar a estrutura química deste resíduo orgânico, análises de FTIR foram realizadas. A Figura 6 apresenta os espectros das diferentes frações extraídas.

Tabela 4 - Massa obtida por extração.

Tipo de solvente	Quantidade (g)	Teor extraído (%)
Diclorometano	0,0916	0,30
Acetato de Etila	0,0430	0,14
Hexano	0,0731	0,24
Etanol	0,0534	0,18

Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 6 - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier.



Fonte: Dados do pesquisador.

No espectro de FTIR podem ser observadas deformações das ligações entre átomos na molécula analisada. Por exemplo, a análise de FTIR da molécula da água mostra somente deformações das ligações oxigênio-hidrogênio (O-H). Estas deformações podem ser classificadas como deformação axial (deformação no eixo da ligação) ou deformação angular (alteração do ângulo de ligação). Para as amostras analisadas, observam-se sinais de deformação axial características de ligação oxigênio-hidrogênio (na região de 3430 cm^{-1}). Observam-se também deformações axiais típicas de ligações C-H na região de 3000 cm^{-1} , típicas de hidrocarbonetos. Também se observam deformações axiais

típicas de ligações C=O na região de 1700 cm^{-1} . Entretanto, o espectro não é típico de um ácido carboxílico, a exemplo do que se esperaria para fenóis. Estes resultados corroboram com uma estrutura alifática, já que sistemas aromáticos não foram identificados. Desta forma, reforça a ideia de que estes compostos, pouco solúveis em água, não devem interferir significativamente nos resultados de solubilização e lixiviação.

5.1.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental do resíduo foi realizada por meio da Norma ABNT NBR 10004:2004 (Classificação de Resíduos Sólidos), ABNT NBR 10005:2004 (Ensaio de Lixiviação), ABNT NBR 10006:2004 (Ensaio de Solubilização) e ABNT NBR 10007:2004 (Amostragem de Resíduos).

5.1.5.1 Corrosividade

O resíduo foi caracterizado como não corrosivo, pois apresenta $\text{pH} = 9,69$ em sua mistura com água na proporção de 1:1 em peso, não ultrapassando o limite estabelecido pela norma ABNT NBR 10004:2004, letra a do item 4.2.1.2 Corrosividade. Dessa maneira a areia de fundição analisada foi classificada como resíduo não perigoso, conforme Relatório de Ensaio n. 26/2013 (Anexo 1).

5.1.5.2 Reatividade

O resíduo ensaiado foi caracterizado como não reativo, pois não apresenta em sua constituição íons cianeto e sulfeto acima do limite estabelecido pela norma ABNT NBR 10004:2004, letra a do item 4.2.1.3 Reatividade. Dessa maneira a areia de fundição analisada foi classificada como resíduo não perigoso, conforme Relatório de Ensaio n. 26/2013 (Anexo 1).

5.1.5.3 Toxicidade

a) Fenol e Formaldeído na Massa Bruta e no Extrato lixiviado

Devido às matérias-primas e o processo que gerou o resíduo, optou-se por analisar fenol e formaldeído na massa bruta e no extrato lixiviado do mesmo, pois esses compostos constam no anexo C

(normativo) – Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos e no anexo E (normativo) – Substâncias tóxicas (código de identificação U188 e U122 respectivamente), da norma ABNT NBR 10004:2004. A concentração de fenol e formaldeído encontrada na massa bruta foi de 0,1 mg/kg (0,16 mg/L e 6,1 mg/kg (9,94 mg/L) respectivamente e concentração no extrato lixiviado foi de 2 µg/L (0,002 mg/L) para o fenol e 0,8 mg/L para o formaldeído. Como a norma ABNT NBR 10004:2004 não faz referências aos limites máximos permitidos para essas substâncias, as concentrações obtidas foram comparados a valores constantes nas resoluções brasileiras (Conama N°357/2008 e 420/2009) e legislações internacionais (americanas e francesas) como a “*Regional Screening Level (RSL) Industrial Soil Table November*” de 2012 e “*Code Permanent: Environnement et Nuisances*” de 1986, sendo que as concentrações encontram-se abaixo dos limites estabelecidos por estas normas.

b) Ensaio de Lixiviação

Os parâmetros analisados no extrato obtido segundo a ABNT NBR 10005:2004, não ultrapassam os limites máximos permitidos do item 4.2.1.4 toxicidade, letra a, anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004, sendo caracterizado como não tóxico. Desta forma, o resíduo neste parâmetro é classificado como não perigoso, conforme Relatório de Ensaio n. 26/2013 (Anexo 1).

5.1.5.4 Ensaio de Solubilização

Dos parâmetros analisados no extrato obtido segundo a ABNT NBR 10006:2004, alumínio, fenóis totais, ferro, fluoreto, mercúrio, sódio e surfactantes apresentam concentrações superiores aos padrões para o ensaio de solubilização, anexo G da ABNT NBR 10004:2004, caracterizando o resíduo como Classe II A – não inerte, conforme Relatório de Ensaio n. 26/2013 (Anexo 1).

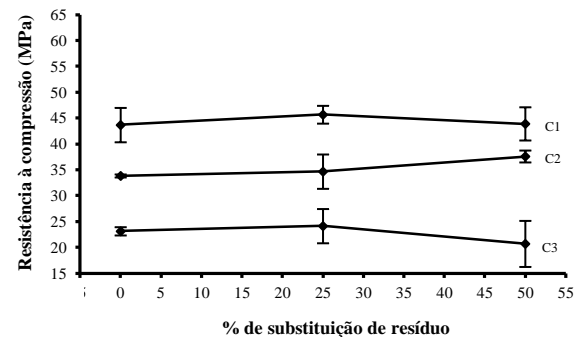
Considerando-se esses resultados, pode-se inferir que sob este aspecto o resíduo de areia de fundição não apresenta impedimento algum para o seu uso na construção civil.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LAJOTAS OBTIDAS

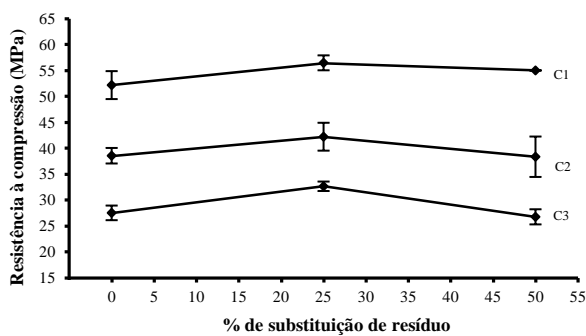
A Figura 7 mostra o efeito da composição e do tempo de cura na resistência à compressão das lajotas aos 28, 56 e 91 dias. Os resultados são coerentes com o esperado para o teor de cimento empregado: quanto maior o teor de cimento presente na amostra, maior a resistência à compressão. É possível observar um aumento natural da resistência média para idade de 56 dias – em relação aos 28 dias – de 17% e um aumento não significativo aos 91 dias. Considerando o efeito da composição, pode-se observar que a mistura com maior teor de cimento atingiu a resistência aos 28 dias de aproximadamente 45 MPa, e de 35 MPa e 25 MPa, para as composições com médio e baixo teores de cimento, respectivamente. Considerando as recomendações da Norma ABNT NBR 9781:2013, pode-se concluir que a Composição C1 atingiria a resistência característica a compressão $f_{pk} \geq 35$ MPa aos 28 dias e que a Composição C2 atingiria a resistência característica a compressão $f_{pk} \geq 35$ MPa aos 56 dias.

Ao se considerar a variável mais importante, o teor de substituição de areia convencional por resíduo de areia de fundição, não se mostrou um fator significativo na resistência à compressão das lajotas (Tabela 5).

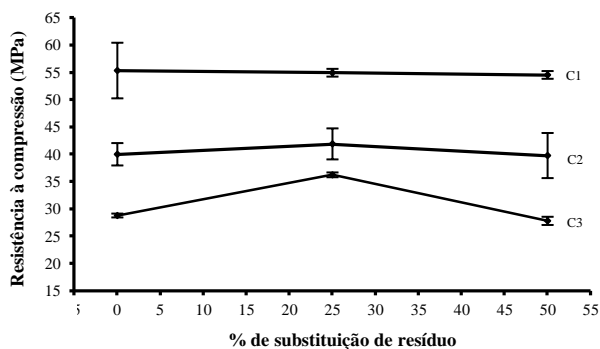
Figura 7 - Efeito do teor de areia de fundição residual e do tempo de cura na resistência à compressão das lajotas obtidas: (a) 28 dias; (b) 56 dias; (c) 91 dias.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 5 - Análise estatística (ANOVA) considerando o efeito da idade e da percentagem de substituição de areia em concreto ($p = 0,604$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Idade (dias)	859,9	2	448,0	4,100	0,020912
Substituição de areia (%)	111,0	2	55,5	0,508	0,604031
Idade (dias) x substituição da areia (%)	33,6	4	8,4	0,077	0,989091
Erro	7321,4	67	109,3	-	-

SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados.

F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos.

gl = graus de liberdade, $p > 0,05$: efeito não significativo

$p < 0,05$: efeito significativo (confiabilidade de 95%).

Fonte: Dados do pesquisador.

Ou seja, os resultados mostram que a utilização de 25 e 50% de resíduo manteve a mesma resistência à compressão média, como se pode observar na Figura 7 e na Tabela 5 ($p = 0,604$). O pequeno aumento médio de resistência utilizando 25% de resíduo pode ter sido causado pelo fator de empacotamento na utilização de dois tipos de areia com distribuição granulométrica provavelmente distinta (DIAS, 1998). Porém o mais importante é o fato de que o resíduo em estudo não apresenta nenhum sinal de deterioração, medida através da resistência, em idade avançada de 91 dias, ao contrário do observado por outros pesquisadores (SILVA et al., 2010). Segundo o trabalho destes autores, que empregaram resíduo de areia de fundição para obtenção de argamassas, a adição deste resíduo exerceu influência significativa no desempenho das argamassas estudadas. Neste trabalho, a adição de resíduo de areia de fundição provocou uma redução acentuada na resistência à compressão em relação à mistura de referência, resultando em expansão excessiva com ocorrência de fissuração. Esse comportamento satisfatório do resíduo de areia de fundição para fabricação de lajotas de concreto pode estar associado ao processo de obtenção do resíduo ou forma de produção na indústria.

O comportamento quanto ao envelhecimento das amostras demonstra que ocorre um ganho com o tempo na resistência destas peças testadas. Percebe-se, ainda, que a adição do resíduo no lugar de areia natural se traduz em um ganho de resistência, principalmente na quantidade de 25%. Com a adição de 50% de resíduo de areia de

fundição, os resultados são comparáveis àqueles sem adição da mesma. Neste aspecto, a adição de resíduo não traz nenhum prejuízo na propriedade de resistência à compressão.

Por fim, esses resultados são importantes, se consideradas as contribuições ambientais conseguidas com o emprego deste resíduo.

5.3 ENSAIO DE TOXICIDADE

5.3.1 Ensaio de toxicidade do resíduo de areia de fundição

O ensaio de toxicidade do resíduo de areia de fundição utilizando *Daphnia magna* apresentou como resultado um fator de toxicidade 1 indivíduo, enquanto que o limite é de 4 indivíduos.

5.3.2 Ensaio de toxicidade dos corpos de prova

5.3.2.1 Ensaio de toxicidade com *Daphnia magna*

A Tabela 6 mostra o fator de toxicidade das *Daphnia magna* expostas às lajotas com diferentes teores de substituição de resíduo de areia de fundição.

Tabela 6 - Fator de toxicidade das *Daphnia magna* expostas às lajotas com diferentes teores de substituição de resíduo de areia de fundição.

Teor de resíduo de areia de fundição nas lajotas (%)	Fator de toxicidade
0	12
25	16
50	12
75	6
Controle negativo (água)	-
Resíduo de areia de fundição	1

Fonte: Dados do pesquisador.

Observa-se na Tabela 6 que as amostras testadas em todas as concentrações se apresentaram tóxicas, já que o número máximo admitido é de 4 indivíduos mortos no teste com *Daphnia magna* (Nº 017 – FATMA de 18/04/2002). Desta forma, considera-se que este teste não

apresenta sensibilidade para diferenciar o efeito tóxico induzido pelo resíduo. Assim, outros testes de ecotoxicidade (raiz de cebola, semente de alface e minhoca) se fazem necessários para um melhor nível de segurança.

Considerando os resultados dos testes de toxicidade do resíduo de areia de fundição e dos artefatos cimentícios, percebe-se que o cimento é determinante para o fator de toxicidade, haja vista que a resíduo de areia de fundição apresentou fator de toxicidade igual a 1.

5.3.2.2 Ensaio de toxicidade aguda em minhocas

Os resultados das leituras do teste de toxidade aguda em minhocas (*Eisenia foetida*), Tabela 7, mostram que os animais são sensíveis aos solubilizados testados.

Tabela 7 - Testes de toxicidade aguda do resíduo de areia de fundição em minhocas.

Teor de resíduo de areia de fundição nas lajotas (%)	Número de indivíduos expostos	Número de indivíduos mortos
0	8	3
25	10	6
50	10	7
75	10	6
Controle negativo (água)	10	0
Resíduo de areia de fundição	10	0

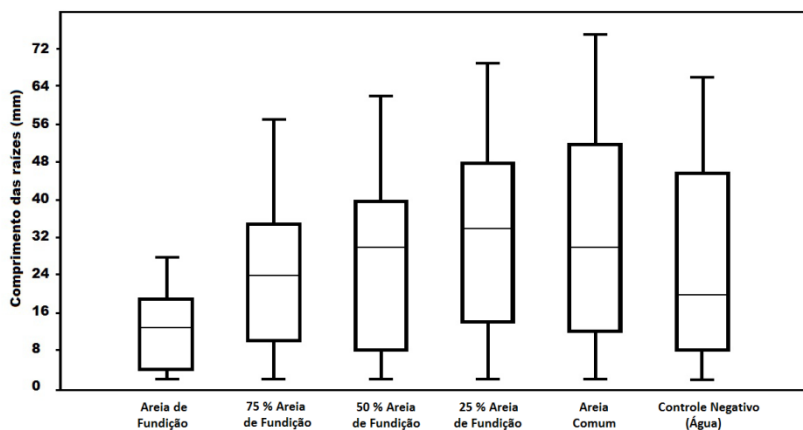
Fonte: Dados do pesquisador.

5.3.3.3 Ensaio de toxicidade com raiz de cebola

A Figura 8 e a Tabela 8 mostram os resultados de toxicidade dos corpos de prova com raiz de cebola. Conforme pode ser observado na Figura 8, o teste utilizando raiz de cebola mostrou-se estatisticamente significativo, ocorrendo uma diferenciação com o aumento da concentração de resíduo de areia de fundição. O valor médio máximo obtido foi para concentração de 25%, sendo que tanto o branco quanto a concentração de 50% mostraram-se valores muito próximos. O teste com o resíduo mostra o menor valor no comprimento das raízes, o que indica uma possível interferência no crescimento destas quando testada

pura, o que demonstra que a mistura com o cimento é efetivo no sentido de reduzir este efeito.

Figura 8 - Comprimento médio e desvio padrão das raízes de *Allium cepa* para os diferentes tratamentos.



Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 8 - Resultado de toxicidade dos corpos de prova com raiz de cebola – Composição C1.

Teor de resíduo de areia de fundição nas lajotas (%)	Comprimento médio das raízes de cebola (mm)
0	27 ± 21
25	33 ± 20
50	26 ± 18
75	23 ± 14
Controle negativo (água)	33 ± 23
Resíduo de areia de fundição	12 ± 8

Fonte: Dados do pesquisador.

Na Tabela 9 se observa que nas condições analisadas não são detectadas semelhanças estatísticas para o crescimento das raízes de cebola entre os diferentes tratamentos.

A Tabela 10 apresenta as comparações pareadas de Tukey. Pode ser observado que os grupos em destaque apresentam diferenças estatísticas, quando comparados à areia de fundição.

Tabela 9 - Análise de variância p (semelhança 95%).

	Somas dos quadrados	df	Média dos quadrados	F	p (95 %)
Entre grupos	32504,5	5	6500,91	20,35	$4,38 \times 10^{-19}$
Intra grupos	240172	752	319,378		
Total	272676	757			
Ω^2	0,1132				

Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 10 - Comparações pareadas de Tukey: Q diagonal inferior, p (semelhança 95%) diagonal superior.

Comp.	Af	75% Af	50% Af	25% Af	An	Negativo
Af	-	0,00003	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
75% Af	6,93	-	0,89	0,00048	0,00018	0,5862
50% Af	8,46	1,54	-	0,02641	0,01209	0,9949
25% Af	12,8	5,87	4,336	-	0,9999	0,1143
An	13,1	6,22	4,679	0,343	-	0,0613
Negativo	9,21	2,29	0,752	3,584	3,926	-

Af: Resíduo de areia de fundição; An: Areia verde.

Fonte: Dados do pesquisador.

Comparando-se os resultados dos testes de toxicidade realizados com *Daphnia magna*, minhoca e raiz de cebola, pode-se perceber que há concordância entre os resultados obtidos para *Daphnia magna* e minhoca, conforme pode ser visualizado na Tabela 11.

Apesar da areia de fundição não apresentar mortalidade para minhocas e para *Daphnia magna*, a mesma interfere no crescimento da raiz de cebola. Algumas possibilidades podem ser apontadas como causadoras deste fenômeno, entre elas a concentração de formaldeído

e/ou ainda alta concentração de metais como alumínio, ferro e sódio evidenciados no teste de solubilidade, conforme Relatório de Ensaio n. 26/2013 (Anexo 1).

Tabela 11 - Resultados comparativos dos testes de toxicidade.

Teor de resíduo de areia de fundição nas lajotas (%)	<i>Daphnia magna</i> ^(a)	Minhoca ^(b)	Comprimento médio das raízes de cebola (mm)
0	12	3/8	27 \pm 21
25	16	6/10	33 \pm 20
50	12	7/10	26 \pm 18
75	6	6/10	23 \pm 14
Controle negativo (água)	-	0/10	33 \pm 23
Resíduo de areia de fundição	1	0/10	12 \pm 8

^(a) Indivíduos mortos

^(b) Número de indivíduos mortos/expostos

Fonte: Dados do pesquisador.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo do efeito da adição de resíduo de areia de fundição na fabricação de artefatos de cimento.

Blocos contendo diferentes teores de areia de fundição foram confeccionados e avaliados por meio de ensaios de resistência à compressão e testes de toxicidade, utilizando-se *Daphnia magna*, raiz de cebola e minhoca.

Os resultados mostraram que a areia de fundição é caracterizada como resíduo Classe II A – Não Inerte. De acordo com ensaios de identificação de compostos orgânicos por extração de solventes, este resíduo não apresentou sistemas aromáticos. Desta forma, foi reforçada a ideia de que estes compostos, pouco solúveis em água, não devem interferir significativamente nos resultados de solubilização e lixiviação.

Com relação à toxicidade, a areia de fundição reduziu o crescimento das raízes de cebola. Por outro lado, com relação à *Daphnia magna* e à minhoca, o número de indivíduos mortos foi muito inferior ao obtido com as composições testadas e à composição padrão (negativo).

Relativo ao comportamento mecânico das composições estudadas, a Composição C1 atingiria a resistência característica à compressão $f_{pk} \geq 35$ MPa aos 28 dias, enquanto que a Composição C2 atingiria a resistência característica à compressão $f_{pk} \geq 35$ MPa aos 56 dias, não havendo redução considerável na resistência à compressão.

Diante disto, o estudo do efeito da adição de resíduo de areia de fundição na fabricação de artefatos de cimento demonstrou ser possível o uso da areia de fundição para confecção de artefatos cimentícios.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros, que um estudo mais apurado seja realizado para esclarecer possíveis interações sinérgicas entre os grupos tóxicos existentes no resíduo de areia de fundição e que possam interferir no desenvolvimento das espécies empregadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARMAGE, L. C. **Utilização de resíduo de areia de fundição para uso em argamassa**, Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Areias de Fundição de Ferro Descartadas: A Visão da ABIFA**. Revista Fundição e Matérias-primas. Edição 78, p. 54-61, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho da Indústria de Fundição no Brasil**. Outubro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Soluções para areias descartadas com o trabalho da ABIFA**. Revista Fundição & Matérias-primas, 97ª ed. São Paulo, maio, 2008(b).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Recuperação de areia Ganha importância**. Fundição e matérias-primas, v.41, n.50, ABIFA, 2001. p. 20.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistemas da gestão ambiental: Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2004(b). 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15702**: Areia descartada de fundição: Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Classificação de Resíduos Sólidos: Procedimento. Rio de janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15537**: Ecotoxicologia Terrestre: Ecotoxicidade Aguda: Método de ensaio com minhocas. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:2004**: Ensaio de Lixiviação: Procediemnto. Rio de janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004**: Ensaio de Solubilização: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:2004**: Amostragem de Resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BIOLO, S. M. **Reuso do Resíduo de Fundação Areia Verde na Produção de Blocos Cerâmicos**. Mestrado Acadêmico em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundação como Agradado em Misturas Asfálticas**. Tese de Doutorado. Departamento de Química, Universidade do Paraná. Curitiba, 2008.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS. **Curso de Formação de Consultores em Produção mais Limpa para Pequena e Microempresa**. Módulo1, Porto Alegre: CNTL, 2003b.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **A produção mais limpa e o consumo sustentável na América Latina e Caribe**, SETESB. PNUMA, São Paulo, 2005.

DÍAS, O.R. V. **Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho**. São Paulo: PINI. 1998. 122 p.

CZEKOSKI, Z. M. W.; OLIVEIRA, R. C. **Influência de diferentes substratos na reprodução e desenvolvimento de *Eisenia foetida***. Cascavel. 2008. 8 p.

ETXEBERRIA, M.; PACHECO, C. MENESES, J.M., BERRIDI, I., **Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates**. Construction and Building Materials. 2010. 24:1594-600.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ecological Effects Test Guidelines**. OPPTS850.4200. Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. EPA. 712-C-96-154.abril: 1996.

FISKESJØ, G. **The Allium test as a standard in environmental monitoring**. Hereditas 102, 1985. 99-112.

GUNEY, Y.; SARI, Y. D.; YALCIN, M.; TUNCAN, A.; DONMMEZ, S. **Re-usage of waste foundry sand in high strength concrete**. Waste Management 30, 2010. 1705-13.

ISO. International Organization for Standardization. 2002, Draft. **Avoidance test for testing the quality of soils and the toxicity of chemicals – Part 1: test with earthworms (*Eisenia foetida*)**. Geneva, ISO.

JUNKES, M. B. **Procedimentos para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos em município de pequeno porte**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

KHATIB, J. M.; ELLIS, D. J. **Mechanical properties of concrete containing foundry sand**. ACI special publication SP-200. American Concrete Institute, 2001. 733-48.

KLINSKY, L. M. G. **Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos**. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2008. 215 p.

MARIOTTIO, C.L. **Recuperação de areia Ganha importância**. Fundição e matérias-primas. ABIFA 41 (50), 2001. 20.

MARIOTTIO, C.L. **Regeneração de areias de Fundição**. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. SMA/SP. 2000. 203-211.

MARIOTTO, C. L. **Regeneração de areias: uma tentativa de discussão temática**. Revista Fundição & Matérias-primas. 42. ed. São Paulo: 2000.

MCINTYRE, S.; RUNDMAN, K.; BAILHOOD, C.; RUSH, S.; STILLWELL, B. **Beneficiation and Reuse of Foundry Sand Residuals**: A Preliminary Report. Transactions of the American Foundrymen's Society, 100, 1992. 201-208.

TRICK, K. A.; SALIBA, T. E. **Mechanisms of the pyrolysis of phenolic resin in a carbon/phenolic composite**. Carbon 33 (11), 1995, 1509-1515.

MOURA, T. N. **Intervenção da produção mais limpa nas indústrias têxteis do município de Jardim de Piranhas**. In: Anais do XXII Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES): Campo Grande, 2005.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; CHUN, Y. M.; RAMME, B. W.; SINGH, S. S. **Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials**, J Mater Civil Eng ASCE, 2003. 400-7.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; CHUN, Y. M.; RAMME, B. W.; SIDDIQUE, R. **Precast concrete products using industrial by-products**, ACI Mater J, 2004. 101:199-206.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC DEVELOPMENT. **Guideline for Testing of Chemicals N° 207**. Earthworm Acute Toxicity Test. Paris. 1984.

OLIVEIRA, N.; MARIA, T.; COSTA, R.; HELENA, R.; **Areia de fundição: uma questão ambiental**, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC, Florianópolis – SC.

SILVA, R. M.; PELISSER, F. **Efeito da areia de fundição em concreto**. Trabalho de Conclusão de curso, Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma (SC), 2011.

RAUP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias**. Tese de Doutorado apresentado a Universidade de Aveiro/ Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, 2006.

PEREIRA, R. L. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas**. Relatório de doutorado apresentado ao Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2005.

PEREIRA, R. L.; SCHMIDT, A. E.; ALMEIDA, C. N. H.; VERRAN, G. O. **Parte I: Utilização de resíduo de areia verde de fundição na preparação de argamassa para aplicação na construção civil**, Anais do Congresso em Ciência de Materiais, Joinville: CD-ROM, 2000.

REDDI, L. N.; RIECK, G. P.; SCHWAB, A. P.; CHOU, S. T.; FAN, L. T. **Stabilization of phenolics in foundry waste using cementitious materials**. Journal of Hazardous Materials 45, 1996. 89-106.

ROCHA, J. P. A.; DA LUZ, C. A.; PERIUS, G.; FILHO, J. I. P.; CAMICIA, R. **Utilização de Areia de Fundição em Concreto Auto-Adensável**. Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto. Novembro 2011. ISSN 2175-8182.

SIDDIQUE, R.; AGGARWAL, Y.; AGGARWAL, P.; KADRI, E.; BENNACER, R. **Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS)**. Construction and Building Materials 25, 2011. 1916-1925.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. **Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete**. Construction and Building Materials 23 (2), 2009. 976-980.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; **Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing**. Resources, Conservation and Recycling 55, 2011. 885-892.

SILVA, P. S. **Avaliação da toxicidade e genotoxicidade das águas do rio Criciúma (SC), utilizando como organismos bioindicadores *Artenia* sp., *Daphnia magna* e *Allium cepa***. 2008, 92 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas), Universidade do Extremo sul catarinense, Criciúma/SC.

SILVA, W. R.; TOCHETTO, E.; PRUDÊNCIO, L. R.; OLIVEIRA, A. L. **A Influência do emprego de resíduo de areia de fundição nas**

propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias. Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto. Outubro 2010.

SILVA, W. R. L.; TOCHETTO, E.; JR PRDUDÊNCIO, L.R.; OLIVEIRA, A. L. **Influência do emprego de resíduo de areia de fundição nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias.** Revista IBRACON de estruturas e materiais 4, 2011. 642-662 – ISSN 1983-4195.

SILVA, T. C.; CHEGATTI, S. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição.** In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO ABIFA, 2007. São Paulo. **CD CONAF 2007.** São Paulo: CONAF, 2007.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. **Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete.** Construction and Building Materials 23 (2), 2009. 976-980.

SILVA FILHO, J. C. G.; SICSÚ, A. B. **Produção mais Limpa: uma ferramenta da Gestão Ambiental aplicada às empresas nacionais.** In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Ouro Preto, Minas Gerais: 2003.

USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW-846, Washington, DC: **Effect of alkaline activation and silica fume addition.** SW 846-3050B.

TRICK, K.Y. A.; SALIBA, T. E. **MECHANISMS OF THE PYROLYSIS OF PHENOLIC RESIN IN A CARBON/PHENOLIC COMPOSITE,** Carbon 33 (11), 1995. 1509-1515.

VIEIRA A.; PELISSER, F. **Concreto autoadensável com adições minerais.** Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto. Novembro 2011. ISSN 2175-8182.

WATANABE, F.A.; NASCIMENTO, M.R.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N.H.A. **Caracterização de pavimentos de concreto fabricados em equipamentos industriais com adição de areia de fundição,** Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville/SC, 2004.

WATANABE, F. A. **Estudo sobre a utilização de resíduo de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina. 2004.

ANEXO - Relatório de Ensaio n. 26/2013.



Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC
Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT
Laboratório de Resíduos Sólidos

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 26/2013

ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
(SEGUNDO ABNT NBR 10004:2004)



Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC
Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - IPAT
Laboratório de Resíduos Sólidos

CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - NBR 10004:2004

Requerido: COOPERMETAL – COOPERATIVA DE METALURGICOS DE CRICIÚMA

Endereço: R. Gabriel Zanette, nº 985 – Próspera – Criciúma - SC

CEP: 88.815-060

Telefone: (48) 3437-0020

Atividade da empresa: Fundição de Ferro e Aço

Responsável: Antonio Tramontin Rossa

REALIZADO POR: Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnologias – IPAT/UNESC

Endereço: Rodovia Jorge Lacerda, km 4,5 – Bairro Sangão – Criciúma – Santa Catarina.

CEP: 88805 – 350

Caixa Postal: 3167

Telefone: (48) 3444-3731

CRQ: 0992 - 13ª Região – SC

DADOS DA AMOSTRA

Resíduo: Areia de Fundição

Gerador do Resíduo: Coopermetal – Cooperativa de Metalúrgicos de Criciúma

Origem do Resíduo: Fundição de metais

Descrição do Resíduo: Areia de fundição com resina fenólica.

Ponto de coleta: Galpão - empresa.

Data da coleta: 10/04/2013

Hora da Coleta: Não consta

Data da entrada no laboratório: 10/04/2013.

Nº da amostra no laboratório: 75755

Número da ficha de coleta: Não consta

Coletor: Cliente.

Metodologia: As metodologias utilizadas pelo Laboratório de Solos são baseadas “SW 846-3050B (USEPA 1986, *Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW-846*, Washington, DC).” e as referências:

Norma NBR 10004 da ABNT – Classificação de Resíduos Sólidos.

Norma NBR 10005 da ABNT – Ensaio de Lixiviação.

Norma NBR 10006 da ABNT – Ensaio de Solubilização.

Norma NBR 10007 da ABNT – Amostragem de Resíduos.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO RESÍDUO

Aspecto: Sólido

Coloração: Cinza

Odor: Químico

Umidade a 105°C (%): 0,25

Densidade (g/cm³): 1,63

Líquidos Livres: Ausente (Método de acordo com a norma ABNT NBR 12988).

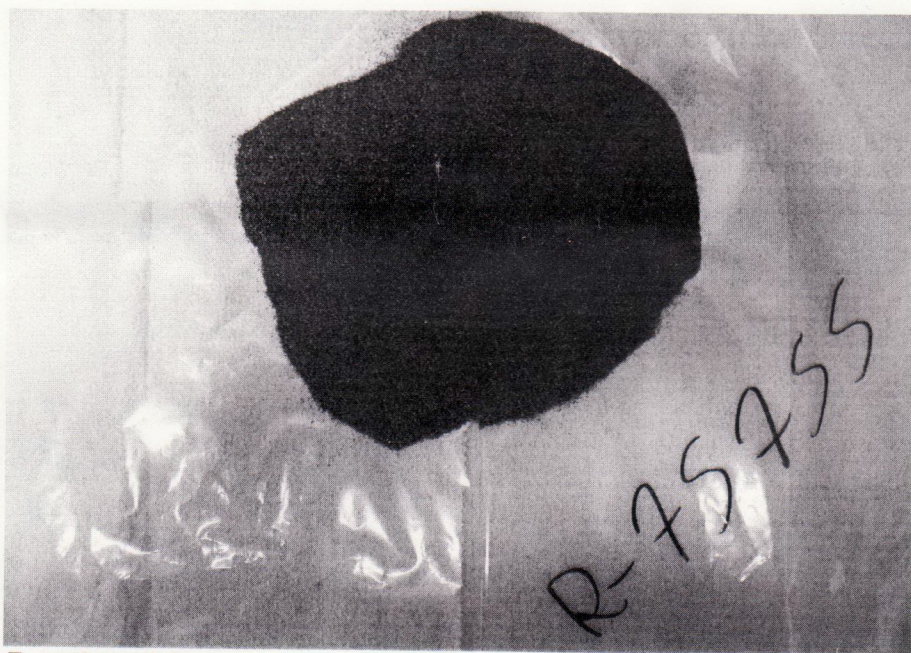


Foto do resíduo

RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

NBR 10004:2004 – MASSA BRUTA

Parâmetros	Unidades	Resultados	Valor Recomendado	L.Q.
Fenol ⁽¹⁾	mg/kg	0,10	-	0,003
Formaldeído ⁽¹⁾	mg/kg	6,1	-	1
Óleos e Graxas	mg/kg	< 1	Ausência	1
Porcentagem de sólidos	% p/p	99,4	-	0,05

Corrosividade

Parâmetro	Resultado	Valor Recomendado	L.Q.
pH em água (1:1)	9,69	2 a 12,4	0,01

Reatividade

Parâmetros	Resultados (mg/kg)	Limite Liberável por kg de Resíduo	L.Q.
Ácido Cianídrico (HCN) ⁽¹⁾	0,3	250mg de HCN	0,1
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	< 40	500mg de H ₂ S	40

NBR 10005:2004 – LIXIVIADO

Parâmetros	Unidades	Resultados	Valor Recomendado	L.Q.
Fenol ⁽¹⁾	µg/L	2	-	0,1
Formaldeído ⁽¹⁾	mg/L	0,8	-	0,5

Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Arsênio	< 0,001	1,0	0,001
Bário	< 0,1	70,0	0,1
Cádmio	< 0,01	0,5	0,01
Chumbo	< 0,05	1,0	0,05
Cromo Total	< 0,02	5,0	0,02
Fluoreto	2,2	150,0	0,1
Mercúrio	< 0,001	0,1	0,001
Prata	< 0,01	5,0	0,01
Selênio	< 0,001	1,0	0,001

Parâmetros Orgânicos ⁽¹⁾

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
1,1 Dicloroetano	< 0,001	3,0	0,001
1,2 Dicloroetano	< 0,001	1,0	0,001
1,4 Diclorobenzeno	< 0,001	7,5	0,001
2,4,5 - T	< 0,001	0,2	0,001
2,4,5 - TP	< 0,001	1,0	0,001
2,4,5 - Triclorofenol	< 0,001	400	0,001
2,4,6 - Triclorofenol	< 0,0005	20	0,0005
2,4 - D	< 0,0005	3,0	0,0005
2,4 - Dinitrotolueno	< 0,001	0,13	0,001

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Aldrin + Dieldrin	< 3E-5	0,003	3E-5
Benzeno	< 0,001	0,5	0,001
Benzo(a)pireno	< 5E-5	0,07	5E-5
Clordano (isômeros)	< 0,0001	0,02	0,0001
Cloreto de Vinila	< 0,001	0,5	0,001
Clorobenzeno	< 0,001	100	0,001
Clorofórmio	< 0,001	6,0	0,001
DDT (isômeros)	< 0,0005	0,2	0,0005
Endrin	< 0,0001	0,06	0,0001
Hexaclorobenzeno	< 0,0005	0,1	0,0005
Hexaclorobutadieno	< 0,001	0,5	0,001
Hexacloroetano	< 0,001	3,0	0,001
3+4 Metilfenol (m + p-cresol)	< 0,002	200	0,002
Metoxicloro	< 0,0005	2,0	0,0005
Nitrobenzeno	< 0,0002	2,0	0,0002
2-Metilfenol (o-cresol)	< 0,001	200	0,001
Pentaclorofenol	< 0,0005	0,9	0,0005
Piridina	< 5	5,0	5
Tetracloroeto de carbono	< 0,001	0,2	0,001
Tetracloroeteno	< 0,001	4,0	0,001
Toxafeno	< 0,0001	0,5	0,0001
Tricloroeteno	< 0,001	7,0	0,001
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	< 2E-5	0,003	2E-5
Lindano (g-BHC)	< 5E-5	0,2	5E-5
Metiletilcetona	< 5	200	5

Dados do ensaio de lixiviação

Solução Extratora Nº	1
pH do extrato lixiviado (final)	5,0
Tempo de Lixiviação (Hora)	18

NBR 10006:2004 – SOLUBILIZADO

Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Alumínio	3,6	0,2	0,01
Arsênio	0,005	0,01	0,001
Bário	< 0,01	0,7	0,01
Cádmio	< 0,001	0,005	0,001
Chumbo	< 0,01	0,01	0,01
Cianeto	< 0,05	0,07	0,05
Cloreto	11,3	250,0	2,5
Cobre	0,03	2,0	0,01
Cromo Total	< 0,02	0,05	0,02
Fenóis Totais	0,05	0,01	0,01
Ferro	0,95	0,3	0,02
Fluoreto	8,0	1,5	0,1
Manganês	0,08	0,1	0,01
Mercúrio	0,029	0,001	0,001
Nitrato (expresso em N)	< 0,1	10,0	0,1
Prata	< 0,01	0,05	0,01

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
Selênio	< 0,001	0,01	0,001
Sódio	226	200,0	0,5
Sulfato (expresso em SO ₄)	16	250,0	10
Surfactantes	1,6	0,5	0,1
Zinco	0,09	5,0	0,01

Parâmetros Orgânicos ⁽¹⁾

Parâmetros	Resultados (mg/L)	VMP 10004:2004 (mg/L)	L.Q.
2,4,5 - T	< 0,001	0,002	0,001
2,4,5 - TP	< 0,001	0,03	0,001
2,4 - D	< 0,0005	0,03	0,0005
Aldrin + Dieldrin	< 3E-5	0,00003	3E-5
Clordano (isômeros)	< 0,0001	0,0002	0,0001
DDT (isômeros)	< 0,0005	0,002	0,0005
Endrin	< 0,0001	0,0006	0,0001
Hexaclorobenzeno	< 0,0005	0,001	0,0005
Metoxicloro	< 0,0005	0,02	0,0005
Toxafeno	< 0,0001	0,005	0,0001
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	< 2E-5	0,00003	2E-5
Lindano (g-BHC)	< 5E-5	0,002	5E-5

Dados do ensaio de solubilização

Umidade a 42°C (%)	15,29
pH do extrato solubilizado (final)	7,8

Observações:

- ⁽¹⁾ Ensaios terceirizados.
- LQ: Limite de Quantificação.
- VMP: Valor Máximo Permitido

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

1. Corrosividade

O resíduo é caracterizado como **não corrosivo**, pois apresenta pH = 9,69 em sua mistura com água na proporção de 1:1 em peso, não ultrapassando o limite estabelecido pela norma **ABNT NBR 10004:2004**, letra **a** do item **4.2.1.2 Corrosividade**. Portanto, o resíduo é classificado como **não perigoso** neste ensaio.

2. Reatividade

O resíduo ensaiado é caracterizado como **não reativo**, pois não apresenta em sua constituição íons cianeto e sulfeto acima do limite estabelecido pela norma **ABNT NBR 10004:2004**, letra **e** do item **4.2.1.3 Reatividade**. Portanto, o resíduo é classificado como **não perigoso** neste ensaio.

3. Toxicidade

3.1 Fenol e Formaldeído na Massa Bruta e no Extrato Lixiviado

Devido às matérias-primas e o processo que gerou o resíduo, optou-se por analisar fenol e formaldeído na massa bruta e no extrato lixiviado do mesmo, pois esses compostos constam no **anexo C (normativo) – Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos** e no **anexo E (normativo) – Substâncias tóxicas (código de identificação U188 e U122** respectivamente), da norma **ABNT NBR 10004:2004**. A concentração de fenol e formaldeído encontrada na massa bruta foi de 0,1 mg/kg (0,16 mg/L) e 6,1 mg/kg (9,94 mg/L) respectivamente e a concentração no extrato lixiviado foi de 2 µg/L (0,002 mg/L) para o fenol e 0,8 mg/L para o formaldeído. Como norma **ABNT NBR 10004:2004** não faz referência aos limites máximos permitidos para essas substâncias, as concentrações obtidas foram comparados a valores constantes nas resoluções brasileiras (**Conama Nº 357/2008 e 420/2009**) e legislações internacionais (americana e francesa) como a **“Regional Screening Level (RSL) Industrial Soil Table November 2012** e **CODE PERMANENT: ENVIRONNEMENT ET NUISANCES, 1986**, sendo que as concentrações encontram-se abaixo dos limites máximos estabelecidos por estas normas.

3.2 Ensaio de Lixiviação

Os parâmetros analisados no extrato obtido segundo a **ABNT NBR 10005:2004**, não ultrapassam os limites máximos permitidos do item **4.2.1.4 toxicidade**, letra **a**, **anexo F** da norma **ABNT NBR 10004:2004**, sendo caracterizado como **não tóxico**. Portanto, o resíduo é classificado como **não perigoso** neste ensaio.

4. Ensaio de Solubilização

Dos parâmetros analisados no extrato obtido segundo a **ABNT NBR 10006:2004**, *alumínio, fenóis totais, ferro, fluoreto mercúrio, sódio e surfactantes* apresentam concentrações superiores aos padrões para o ensaio de solubilização, **anexo G** da **ABNT NBR 10004:2004**, caracterizando o resíduo como não inerte neste ensaio e classificando-o como **não perigoso - classe II A – não inerte**.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resíduo não consta nos anexos A ou B.

Não é inflamável.

Considerando os resultados obtidos no decorrer dos ensaios da massa bruta, lixiviação, solubilização e das características Físico-Químicas do resíduo, o mesmo (**Areia de Fundição**) é classificado como **Classe II A – Não Inerte** segundo a norma **ABNT NBR 10004:2004**, nos parâmetros analisados.

Devido à presença de formaldeído na massa bruta e a ausência de valores máximos permitidos para esse parâmetro na norma **ABNT NBR 10004:2004**, recomenda-se que para fins de aplicabilidade desse resíduo sejam efetuados testes para avaliar se na prática a concentração encontrada confere toxicidade de acordo com as diferentes vias de exposição incluindo ensaios de ecotoxicidade.

A identificação dos constituintes (parâmetros) avaliados na caracterização foi estabelecida de acordo com o processo que deu origem ao resíduo, matérias-primas, insumos e a segregação do mesmo. Dados fornecidos pelo interessado.

CLASSIFICAÇÃO: RESÍDUO NÃO PERIGOSO - CLASSE II A – NÃO INERTE.

Responsável Técnico
Química Teresinha Lúcio - CRQ 13200109

Criciúma, 06 de junho de 2013.